

X-Band 모노펄스 추적 레이더를 위한 광대역 도파관 Magic-T 최적화 설계

Optimization of a Broadband Waveguide Magic-T for X-Band Monopulse Tracking Radars

황 금 철

Keum Cheol Hwang

요 약

본 논문에서는 광대역 X-Band 추적 레이더의 모노펄스 비교기(comparator)에 적용 가능한 도파관 magic-T 설계 및 최적화 문제에 대해서 고찰하였다. 다층으로 구성된 도체 실린더(cylinder)를 이용하여 기존의 X-Band magic-T에 비해 광대역의 임피던스 정합을 구현하였다. 최적화된 파라미터 도출을 위해 유전 알고리즘과 particle swarm optimization을 결합한 하이브리드 최적화 알고리즘을 설계에 적용하였으며, 최적 설계된 도파관 magic-T는 모든 도파관 포트에 대해, 최소 12% 이상의 대역폭에서 -20 dB 이하의 반사 특성을 나타내었다. 전력 분배 손실은 0.2 dB 이하이며 전력 분배 편차 또한 0.1 dB 이하로 우수한 특성을 보여주었다. 또한 측정된 결과는 시뮬레이션 결과와 잘 일치하는 것을 확인하였다. 마지막으로, 적층 실린더의 차수를 증가시켜 5단 및 7단 적층된 구조에 대한 대역폭 성능도 분석하였다.

Abstract

Design and optimization of a broadband waveguide magic-T was performed for X-Band tracking radars. A multi-stepped conducting cylinder was used to enhance the bandwidth performance of the conventional waveguide magic-Ts. Particles swarm optimization in conjunction with genetic algorithm was employed to obtain the optimized geometrical parameters. The optimized design exhibits low reflection coefficient below -20 dB at all waveguide ports with frequency bandwidth of 12%. The transmission loss and difference are within 0.2 dB and 0.1 dB, respectively. Measured results are also shown to be in good agreement with the simulated results. Finally, the bandwidth performances for five and seven-stepped conducting cylinders are also investigated.

Key words : Waveguide Magic-T, Monopulse Comparator, Hybrid Particle Swarm Optimization

I. 서 론

추적 레이더는 매우 고이득(통상 10도 이내의 빔 폭)의 안테나 복사 빔을 이용하여 물체를 자동으로 추적하는 레이더의 한 형태이다. 초기의 추적 레이더는 안테나 복사 빔을 순차적으로 스위칭하고, 각 빔으로부터 수신되는 수신 신호의 크기를 비교하여

안테나의 방향을 보정하는 형태의 순차적 로빙(sequential lobing) 기법을 주로 사용하였다. 그러나 이러한 순차적 로빙법은 물체로부터 반사되는 수신 신호의 데이터량에 한계가 있기 때문에 빠르게 움직이는 물체를 추적하는 데 한계가 있을 뿐만 아니라, 기계적인 진동에 취약한 단점이 있었다. 이러한 단점을 보완하기 위해 순차적 로빙 방식이 아닌, 동시 로

「이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0072636).」

동국대학교 전자공학과(Department of Electronics Engineering, Dongguk University)

· 논문 번호 : 20090710-063

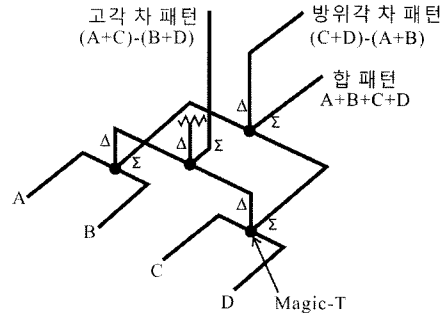
· 수정완료일자 : 2009년 8월 20일

빙(simultaneous lobing) 기법을 이용하는 모노펄스(monopulse) 추적 알고리즘이 제안되었다^[1].

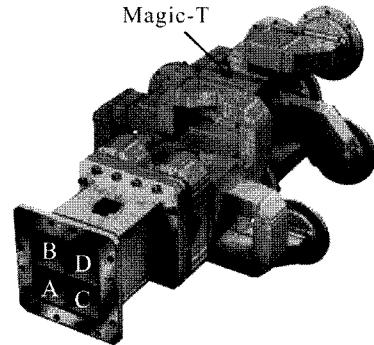
모노펄스 추적 알고리즘은 2개 혹은 4개의 다중 복사 빔을 형성하여 각 빔으로부터 동시 수신되는 펄스의 크기를 비교함으로써 물체의 각도 정보를 획득하는 기법이기 때문에 순차적 로빙법에 비해 많은 양의 수신 데이터 획득이 가능하다. 또한 서로 다른 빔으로부터 동시 수신된 신호의 비를 사용함으로써, 진동에 의한 펄스와 펄스 간의 오차 에러가 거의 발생하지 않는 장점이 있다. 이러한 장점 때문에 오늘날 대부분의 추적 레이더는 모노펄스 형태를 기반으로 하고 있다.

다중 안테나 빔을 이용하는 초기의 모노펄스 시스템은 일반적으로 4개의 동일한 빔을 사용하는 것을 전제로 하였다. 그러나 동일한 이득과 위상 특성을 갖도록 설계된 안테나이더라도, 각 안테나의 복사 특성은 시간, 주파수, 그리고 기타 외부적인 요인에 따라서 조금씩 상이한 특성을 나타내게 되므로 이러한 특성은 추적 오차의 요인으로 작용하게 된다. 이러한 오차 문제를 해결하는 방법으로, 그림 1과 같은 비교기(comparator)를 구성하여, 한 개의 합패턴(sum pattern)과 고각과 방위각 방향의 2개의 차패턴(difference pattern)을 이용하는 모노펄스 추적 방식이 제안되었다.

본 논문에서 설계하고자 하는 도파관 magic-T 접합 구조는 그림 1과 같이 합/차 패턴 생성을 위한 모노펄스 비교기 구현에 필수적인 부분으로서 모노펄스 비교기의 전체 동작 주파수 대역폭을 결정하는 중요한 초고주파 요소 부품 중 하나이다. 이러한 도파관 magic-T의 해석 및 설계에는 주로 FDTD/ Matrix-pencil method^[2] 혹은 finite element/modal expansion^[3]과 같은 수치 해석 기법이 사용되었다. 또한 임피던스 정합을 위한 도체 포스트와 septum을 내장한 magic-T 구조를 3차원 boundary integral-resonant mode expansion 기법을 이용하여 해석하고, 설계를 수행하였다^[4]. 이러한 도체 포스트와 septum을 내장한 magic-T 구조는 그 동작 주파수 대역폭이 10% 내외로(-20 dB 반사계수 기준) 다소 좁기 때문에 광대역 모노펄스 시스템에 적용하기 어려운 단점이 있다. 이러한 좁은 대역폭 특성을 개선하기 위하여 다중 병렬 인덕턴스 성분으로 증가화 할 수 있는, 3



(a) 모노펄스 비교기의 구성도
(a) Configuration of the monopulse comparator



(b) MDL 社의 WR187 도파관 모노펄스 비교기
(b) WR187 waveguide monopulse comparator of MDL

그림 1. 합과 차 패턴 생성을 위한 모노펄스 비교기
Fig. 1. Monopulse comparator for sum and difference pattern generation.

단-적층된 도체 실린더를 Ku-대역 magic-T의 임피던스 정합부로 활용한 구조가 제안되었다^[5].

본 논문에서는 n-단 적층된 도체 실린더 구조를 이용하여 X-대역에서 동작하는 광대역 도파관 magic-T의 최적화 설계를 수행하였다. 2장에서는 n-단 적층된 도체 실린더 구조를 내장한 도파관 magic-T를 제안한다. 또한 본 연구에서는 최적화된 magic-T 설계 파라미터 도출을 위해 입자 군 최적화(Particle Swarm Optimization: PSO)에 기반한 변형 최적화 기법을 적용하였다. 3장에서는 잘 알려져 있는 유전자 알고리즘(genetic algorithm)과 입자 군 최적화(PSO) 기법을 동시 적용한 하이브리드(hybrid) PSO 기법을 magic-T 설계에 적용하고, 적합도 함수의 수렴성을 기준으로 최적화 정도를 평가하였다. 마지막으로 4장에서는 최적 설계된 magic-T의 성능에 대해서 고찰하고 측정 결과와 비교 분석한다.

II. 광대역 Magic-T 설계

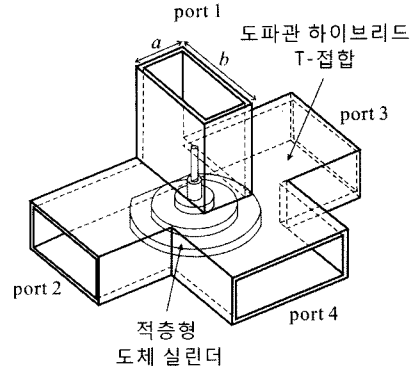
그림 2(a)는 제안하는 광대역 magic-T의 구조를 보여주고 있다. Magic-T는 도파관의 E-면과 H-면의 접합으로 이루어진 도파관 하이브리드 T-접합부와 4개의 도파관 입·출력 포트, 그리고 임피던스 정합을 위한 적층형 도체 실린더로 구성되어 있다. 도파관 하이브리드 T-접합 구조는 구조적으로 임피던스 정합이 되어 있지 않기 때문에, 정합을 위한 도체 스텝(stub)과 포스트(post) 같은 구조를 필요로 한다⁴⁾.

스텝과 포스트를 조합한 형태의 임피던스 정합 구조는 실현 가능한 주파수 대역폭이 10 % 내외로 좁을 뿐만 아니라, 딥 브레이징(dip brazing) 공정을 통한 제작이 까다로운 단점이 있다. 그러나 그림 2에서 제안하는 적층형 실린더를 사용하는 경우는 대역폭 성능을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 브레이징을 사용하지 않고도 후면 탭(tap) 가공을 통한 제작이 용이한 장점도 있다. 적층형 도체 실린더의 상세한 구조를 그림 2(b)에 나타내었다. 적층형 도체 실린더는 n -개의 원통형 실린더로 이루어져 있으며, 아래층에서 위층으로 갈수록 반지름이 감소하도록 설계하였다. 적층 실린더는 $x-y$ 평면($z=0$)을 기준으로는 대칭이지만, y -축을 따라서는 도파관의 중심에서 ℓ 만큼 벗어나 있다. 따라서 $r_n + \ell > b/2$ 인 경우는 실린더의 일부가 도파관의 외부 영역으로 벗어나게 되며, 이 경우 벗어난 부분은 해석 시 고려할 필요가 없다(그림 2(c) 참조).

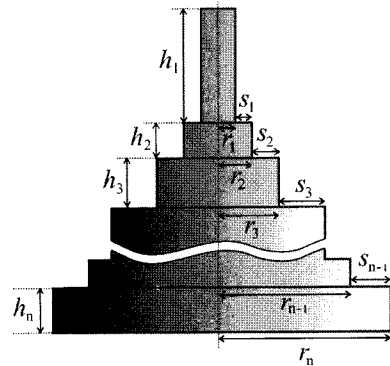
III. Hybrid Particle Swarm Optimization 적용

PSO의 수렴성은 다른 최적화 기법에 비해 빠른 것으로 알려져 있다. 그러나 최적화 속도를 더욱 개선하기 위한 방법으로서 GA와 PSO를 결합한 하이브리드 최적화(Genetical Swarm Optimization: GSO)에 대한 연구가 수행되었다^{6),17)}. GSO의 경우 기본 최적화는 PSO를 이용하면서, 각 iteration 단계에서 개체의 일부를 임의로 선택하여 선택된 개체만 GA를 이용하여 진화시키는 협력적 최적화 기법(cooperative optimization technique)이다.

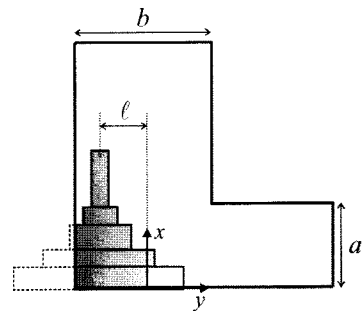
본 논문에서는 참고문헌 [7]에서 적용된 GSO 기법을 광대역 magic-T 설계에 적용하였다. 도파관 하이브리드 접합을 위해서 X-대역 표준 도파관인 WR-



(a) 적층형 도체 실린더를 내장한 magic-T
(a) Magic-T with a stepped conducting cylinder



(b) 적층형 도체 실린더의 상세도
(b) Detailed profile of the stepped conducting cylinder



(c) 측면도
(c) Sideview

그림 2. 광대역 도파관 magic-T
Fig. 2. Broadband waveguide magic-T.

90($a=10.16$ mm, $b=22.86$ mm)을 사용하였다. 도파관의 크기는 고정하였으며, 최적화 알고리즘을 통해 결정할 파라미터는 적층 실린더 각 층의 높이($h_1 \sim h_n$), 반경($r_1, s_1 \sim s_{n-1}$), 그리고 중심으로부터의 오프셋 길이(ℓ)이다. 먼저, GSO를 이용한 최적화 수행을 위하여 아래와 같은 PSO 알고리즘을

구현하였다.

$$V_{n+1} = w * V_n + c_1 * rand() * (P_{best, n} - x_n) + c_2 * rand() * (G_{best, n} - x_n) \quad (1)$$

상수 $c_1 = c_2 = 1.492$ 이며, w 는 최적화 iteration 동안 0.9에서 0.4로 선형 감소하도록 설정하였다. GA 알고리즘 또한 roulette wheel 선택법과 확률 80%의 uniform crossover를 적용하고, 전체 개체 수의 15% 변이(mutation)를 허용하는 조건으로 구현하였다. GA와 PSO 모두 50%의 감쇠(damping) 계수를 갖는 감쇠 경계 조건(damping boundary condition)을 적용하였다. 최종적으로, 구현된 PSO와 GA 알고리즘을 상호 결합하여 0.2의 결합 계수(hybridization coefficient, h_c)를 가지는 GSO를 구현하였다. 결합 계수가 0.2이면, PSO의 각 iteration마다 개체 수의 20% ($h_c = 0.2$)를 랜덤하게 선택하고, 선택된 개체들은 GA를, 나머지 80%는 PSO를 기반으로 최적화를 수행하게 된다. GSO를 이용한 최적화에는 30개의 개체가 사용되었다. 최적화 정도의 적합도를 평가하기 위한 비용 함수(cost function)는 각 도파관 포트에서의 반사 계수(reflection coefficient)를 최소화하는 형태로 다음과 같이 결정하였다.

$$Cost = \sum_{i=1,2,4} \sum_{n=1}^{101} |\max[0, S_{ii}(f_n) - S_{obj}]|^2 \quad (2)$$

여기서 $S_{ii}(f_n)$ 는 주파수 f_n 에서 i -번째 도파관에서의 반사 계수이고, S_{obj} 는 반사 계수의 목표치이다. 포트 3의 반사 계수는 포트 2와 동일하기 때문에, 비용 함수에는 포함시키지 않았다.

GSO는 그림 3과 같이 상용 초고주파 해석 툴인 CST Microwave Studio(MWS)와 링크가 가능하도록 MATLAB 코드로 구현하였다. 각 iteration 단계에서 결정된 최적화 파라미터 값은 VBA(Visual Basic Applications) link를 통해서 CST MWS로 넘겨지게 된다. CST MWS는 넘겨받은 파라미터를 바탕으로 magic-T 시뮬레이션 프로젝트를 생성한 후, 시뮬레이션을 수행하여 각 도파관 포트에서의 반사계수를 계산한다. 계산된 반사계수는 다시 MATLAB의 GSO 코드로 전달되어 비용 함수를 계산하고, 이전 설계 파라미터를 업데이트한다. GSO는 이러한 반복 과정을 통해서 초기의 랜덤(random) 파라미터로부

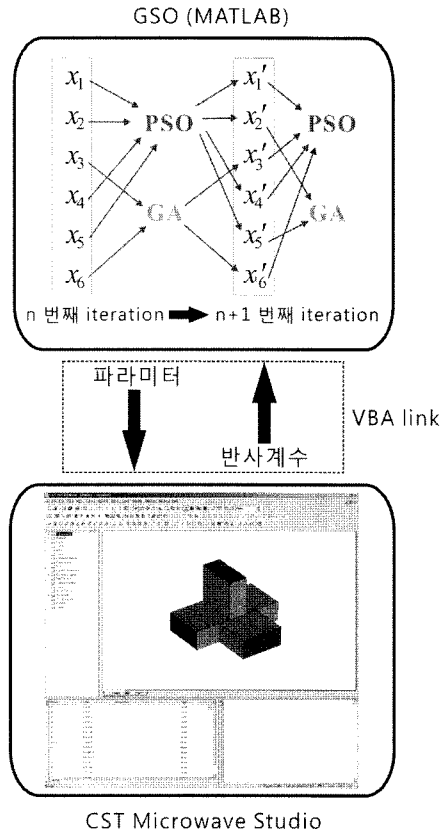


그림 3. VBA를 이용한 GSO 알고리즘과 CST MWS의 연결

Fig. 3. Linking between GSO algorithm and CST MWS through VBA.

터 출발하여 최소의 비용 함수를 갖는 최적화된 파라미터 값을 찾아가게 된다.

IV. 최적화 설계 결과

그림 4는 3단 적층된 정합 실린더($n=3$)에 대한 iteration별 최저 비용 함수 값을 나타낸다. $n=3$ 인 경우의 최적화에서는 동작 주파수 $9 \leq f_n \leq 10$ GHz에서 $S_{obj} = -20$ dB를 목표로 하는 것으로 설정하였다. 또한, 적층형 실린더를 도파관 내벽에 밀착시킬 수 있도록 하기 위해 $r_3 + l = b/2$ 가 성립하도록 파라미터를 설정하였다. 최초 비용 함수값은 7138.4 (77.07 dB)였으나, 51번의 iteration을 거친 후 최적화된 비용 함수값이 0 ($-\infty$ dB)으로 감소하였으므로, 목표로 한 설계 최적화를 달성하였음을 알 수 있다.

본 논문의 설계 최적화에는 인텔 3.0 GHz 계운

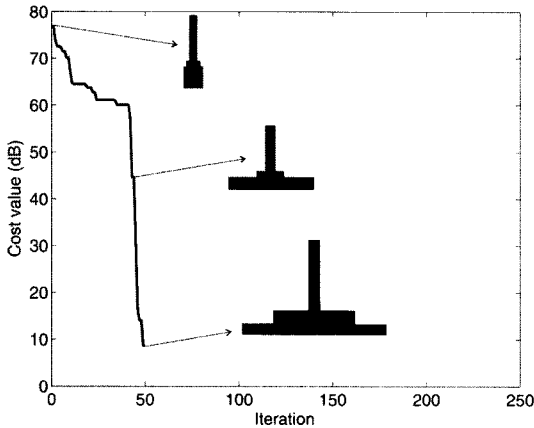


그림 4. 최적화에 따른 비용함수($n=3$)
Fig. 4. Cost value versus iteration number($n=3$).

표 1. 최적화된 적층형 실린더의 설계 값($n=3$)
Table 1. Optimized parameters of the stepped conducting cylinder($n=3$).

파라미터	최적화 범위	최적화 결과
r_1	0.1 ~ 6 mm	0.80
s_1	0.1 ~ 6 mm	5.10
s_2	0.1 ~ 6 mm	4.50
h_1	0.5 ~ 10 mm	10.11
h_2	0.5 ~ 6 mm	1.92
h_3	0.5 ~ 6 mm	1.50
ℓ	0.1 ~ 5 mm	1.03

(Zeon) 쿼드 코어 CPU를 사용하였으며, 한 번의 시뮬레이션에 약 19초가 소요되었다. 따라서 30개의 개체를 이용하여 51번의 iteration 동안 소요된 총 최적화 설계 시간은 8.1 시간이었다. 표 1에 최적화된 파라미터를 나타내었다. 최적화 결과는 소수점 이하 두 자리까지 표기하였다.

그림 5는 최적화 된 설계 파라미터를 바탕으로 제작된 magic-T의 형상을 보여주고 있다. WR-90 도파관과 3단 적층된 실린더형 정합부는 CNC 가공으로 제작하였다. 제작된 magic-T는 X-Band 도파관 calibration kit과 회로망 분석기(network analyzer)를 이용하여, 각 도파관 포트에서의 반사 계수 및 투과 계수를 측정하였다. 그림 6은 측정된 반사 계수와 포트 간 격리도(isolation)를 보여주고 있다. 포트 1에서의 측정된 -20 dB 반사 계수 대역폭은 15.2 % (8.90 ~

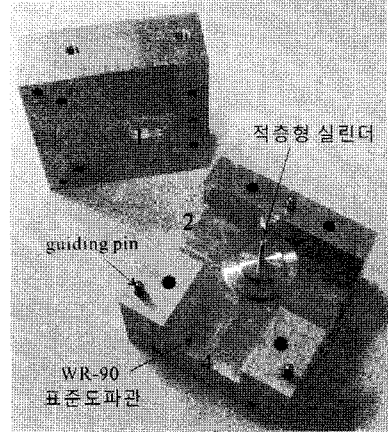


그림 5. 제작된 도파관 magic-T 형상($n=3$)
Fig. 5. Fabricated waveguide magic-T($n=3$).

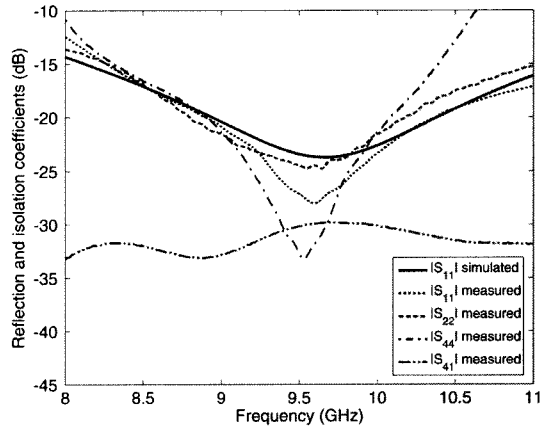


그림 6. 최적화된 도파관 magic-T의 반사 및 격리 계수 측정 결과($n=3$)
Fig. 6. Measured reflection and isolation coefficients of the optimized waveguide magic-T($n=3$).

10.36 GHz), 포트 2와 4에서는 각각 14.77 % (8.78 ~ 10.18 GHz), 12.43 % (8.90 ~ 10.08 GHz)였다. 또한, 포트 1에서의 측정된 반사 계수는 시뮬레이션 결과와 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 합(포트 4)과 차 포트(포트 1) 사이의 격리도(S_{41}) 또한 모든 측정 주파수 대역에서 -29 dB 이하로 우수한 특성을 나타내었다.

그림 7은 차 포트로부터 포트 2와 3으로의 전력 분배 특성(S_{21} , S_{31})에 대한 측정 결과를 보여주고 있다. -20 dB 반사 대역폭 내에서, 전력 분배 손실은 0.2 dB 이하였으며, 각 포트 간 전력 분배 편차는 0.1 dB 이내로 우수한 -3 dB 전력 분배 특성을 보여주

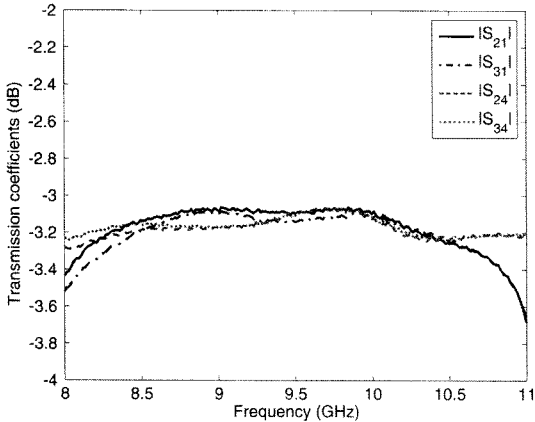


그림 7. 최적화된 도파관 magic-T의 투과 계수 측정 결과($n=3$)

Fig. 7. Measured transmission coefficient of the optimized waveguide magic-T($n=3$).

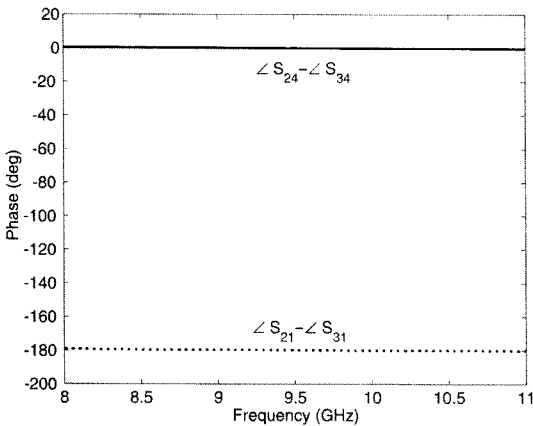


그림 8. 투과 계수의 위상 차 측정 결과($n=3$)

Fig. 8. Measured phase differences of the transmission coefficients($n=3$).

었다. 합 포트에서 포트 2, 3으로의 전력 분배 특성 (S_{24} , S_{34}) 또한 유사한 특성을 보여 주고 있다. 그림 8은 합 포트와 차 포트로부터 투과계수의 위상 특성을 나타낸다. 전체 측정 주파수에서, 합 포트 투과 계수의 위상 차($\angle S_{24} - \angle S_{34}$)는 거의 0° 이며, 차 포트에서는 -180° 로서 광대역 합과 차 분배 특성을 나타내고 있다.

지금까지는 참고문헌 [5]에서 제시한 $n=3$ 인 3단 적층된 도체 실린더에 대한 정합 특성을 고찰하였다. 그러나 주파수 대역폭을 더욱 향상시키기 위해 5단 및 7단으로($n=5, 7$) 적층된 정합 실린더 구조에 대해서도 동일한 설계 최적화를 수행하였다. 여기서

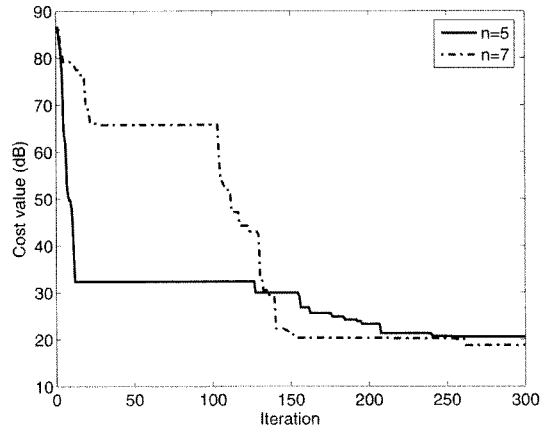


그림 9. 최적화에 따른 비용함수($n=5, 7$)

Fig. 9. Cost value versus iteration number($n=5, 7$).

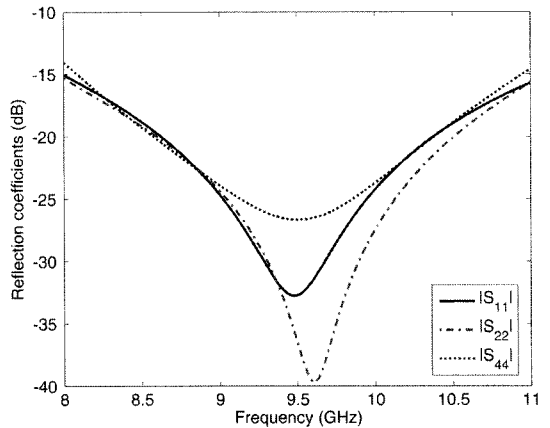


그림 10. 최적화된 도파관 magic-T의 반사 계수 시뮬레이션($n=5$)

Fig. 10. Simulated reflection coefficients of the optimized waveguide magic-T($n=5$).

는 -20 dB 반사 대역폭의 설계 목표치를 21% ($8.5 \sim 10.5$ GHz)로 확장하여 최적화를 수행하였다. 최적화에 따른 각 iteration별 비용함수의 결과는 그림 9에 나타내었다. 총 300번의 iteration을 수행한 결과, $n=5$ 인 경우에는 $10.67(20.56$ dB), $n=7$ 인 경우에는 $8.62(18.7$ dB)의 최저 비용함수 값을 달성하였다. 따라서 7단으로 적층한 경우가 5단 적층에 비해 향상된 대역폭 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그러나 두 경우 모두 애초에 목표로 한 설계치를 달성하지는 못했다.

300번의 iteration 이후 도출된 5단 및 7단 적층된 정합 실린더의 설계 파라미터를 표 2에 정리하였다.

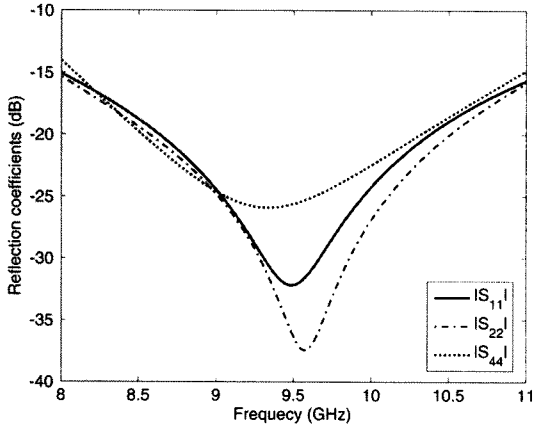


그림 11. 최적화된 도파관 magic-T의 반사 계수 시뮬레이션($n=7$)

Fig. 11. Simulated reflection coefficients of the optimized waveguide magic-T($n=7$).

표 2. 최적화된 적층형 실린더의 설계 값($n=5, 7$)

Table 2. Optimized parameters of the stepped conducting cylinder($n=5, 7$).

파라미터	최적화 범위	최적화 결과($n=5$)	최적화 결과($n=7$)
r_1	0.1~6 mm	0.53	0.61
s_1	0.1~6 mm	1.11	0.16
s_2	0.1~6 mm	2.90	0.68
s_3	0.1~6 mm	4.13	1.47
s_4	0.1~6 mm	3.63	3.07
s_5	0.1~6 mm	X	2.73
s_6	0.1~6 mm	X	3.17
h_1	0.5~10 mm	8.12	8.07
h_2	0.5~6 mm	3.40	1.05
h_3	0.5~6 mm	1.20	1.00
h_4	0.5~6 mm	1.37	1.15
h_5	0.5~6 mm	1.16	1.03
h_6	0.5~6 mm	X	0.97
h_7	0.5~6 mm	X	1.28
ℓ	0.1~5 mm	2.04	1.91

그림 10과 11은 표 2에 정리된 최적화 파라미터를 바탕으로 도파관 포트에서의 반사 계수를 시뮬레이션한 결과이다. 먼저, $n=5$ 인 경우에는 포트 1, 2, 4에서의 -20 dB 반사계수 대역폭이 각각 18.3 %(8.63

~10.37 GHz), 19.8 %(8.61~10.5 GHz), 18.9 %(8.59~10.38 GHz)로 3단 적층된 경우에 비해 더욱 향상된 대역폭 특성을 보여 주었다. 그림 11의 7단 적층된($n=7$)인 경우에는 포트 1, 2, 4에서의 -20 dB 반사 계수 대역폭이 각각 18.3 %(8.64~10.38 GHz), 20.3 %(8.57~10.51 GHz), 19.0 %(8.52~10.31 GHz)로 5단 적층된 경우에 비해 개선되기는 하였으나, 대역폭 향상 효과는 다소 미미하였다. 따라서 적층형 정합 실린더를 내장한 형태의 magic-T 구조에서 도출할 수 있는 최대 반사 대역폭(-20 dB 기준)은 약 19 % 정도로 추정할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 광대역 추적 레이더에 적용 가능한 X-Band 도파관 magic-T의 설계 최적화를 수행하였다. PSO와 GA를 결합한 하이브리드 최적화 기법을 구현하고 VBA를 이용하여 상용 시뮬레이션 소프트웨어와 결합하여 정확하면서도 빠른 최적 설계 파라미터의 도출이 가능함을 보였다.

3단 적층된 도체 실린더를 내장한 도파관 magic-T의 측정 결과는 시뮬레이션 결과와 잘 일치하였다. 또한, 모든 도파관 포트에서 측정된 -20 dB 반사계수 대역폭이 12 % 이상임을 확인하였다. 뿐만 아니라 다층 실린더의 적층 차수를 5단 및 7단으로 확장하여 최적화를 수행한 결과, 최대 19 %의 반사 대역폭을 갖는 광대역 magic-T 구현이 가능함을 증명하였다. 따라서 본 논문에서 제안하는 magic-T 구조는 광대역 합/차 채널을 요구하는 모노펄스 비교기 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] S. M. Sherman, *Monopulse Principles and Techniques*, Artech House, ch. 1, 1984.
- [2] J. Ritter, F. Arndt, "Efficient FDTD/matrix pencil method for the full-wave scattering parameter analysis of waveguiding structures", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 44, no. 12, pp. 2450-2456, Dec. 1996.
- [3] Z. Shen, C. L. Law, and C. Qian, "Hybrid finite-element-modal-expansion method for matched ma-

- gic T-junction", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38, no. 2, pp. 385-388, Mar. 2002.
- [4] A. A. San Blas, F. Mira, V. E. Boria, B. Gimeno, M. Bressan, and P. Arcioni, "On the fast and rigorous analysis of compensated waveguide junctions using off-centered partial-height metallic posts", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 55, no. 1, pp. 168-175, Jan. 2007.
- [5] R. Beyer, U. Rosenberg, "CAD of magic tee with interior stepped post for high performance designs", *IEEE-MTTs Int. Microw. Symp. Digest*, vol. 2, pp. 1207-1210, Jun. 2003.
- [6] A. Gandelli, F. Grimaccia, M. Mussetta, P. Pirinoli, and R. E. Zich, "Genetical swarm optimization: an evolutionary algorithm for antenna design", *Automatika.*, vol. 47, no. 3-4, pp. 105-112, Dec. 2006.
- [7] 황금철, "Hybrid Particle Swarm Optimization 기법을 적용한 X-대역 광대역 편파 변환기 설계", *한국전자과학회논문지*, 20(4), pp. 390-395, 2009년 4월.

황 금 철



2001년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)

2003년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자전공 (공학석사)

2006년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자전공 (공학박사)

2006년 1월~2008년 7월: 삼성탈레스기술연구소 책임연구원

2008년 9월~현재: 동국대학교 전자공학과 조교수

[주 관심분야] 전자파 복사 및 산란해석, 통신 및 레이다 안테나, 최적화 알고리즘 등